МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 62-192(075.8) https://doi.org/10.23947/1992-5980-2018-18-4-392-400

Надежность деталей и неремонтируемых узлов при проектировании машин*

Ю. П. Маньшин[1], Е. Ю. Маньшина[2]**
[1, 2] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Reliability of parts and unrestorable components in the machine design***

Yu. P. Manshin[1], E. Yu. Manshina[2]**
[1,2] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. В статье рассматриваются вопросы нормирования показателей надежности на ранних стадиях проектирования машин. Такой подход обеспечивает соблюдение заданного уровня надежности при разработке деталей, критичных с точки зрения стабильной эксплуатации. Цель работы — исследовать проблемы проектирования в указанной сфере. Анализ методов нормирования надежности позволяет утверждать, что их недостаточно для проектирования. Кроме того, отмечены противоречия, связанные с использованием в проектировании экспоненциального закона надежности.
Материалы и методы. На стадии технического задания определены численные значения наработки и безотказности машины. Затем значения вероятностей безотказной работы или отказов системы и ее элементов представлены степенными выражениями. В них степени являются параметрами ранжирования показателей безотказности элементов системы.
*Результаты исследования***.** Синтезирован альтернативный подход к нормированию, который позволяет выполнить полный структурный анализ проекта. Таким образом, могут быть оценены показатели надежности всей системы или деталей, безотказность которых определяет надежность машин. Детали и другие элементы, отказы которых не внезапны, рассматриваются без применения экспоненциального закона. При этом сохраняется свойственная ему простота математических операций.
Обсуждение и заключения. Для проектирования с заданным уровнем надежности недостаточно числового значения вероятности безотказной работы (ВБР) машины в целом, принимаемого на стадии технического задания. Необходимы требуемые ВБР и наработки элементов системы, которые являются источниками отказов, развивающихся по разным законам. Полученные результаты могут быть использованы как при проектировании новых механических систем с заданным уровнем надежности, так и при модернизации машин.

Introduction. The issues on standardization of reliability indices in the early stages of machine design are considered. This approach maintains the target level of reliability when developing parts that are critical in view of stable operation. The work objective is to study design problems in this area. The analysis of the reliability regulation methods suggests that they are insufficient to design. Besides, there are some contradictions associated with the use of the exponential failure law in design.
Materials and Methods. At the stage of the task order, the numerical values of the operation time and reliability of the machine are determined. Then the values of the reliability probabilities or failures of the system and its elements are shown by exponential expressions. In them, degrees are the ranking parameters of the system reliability indices.
Research Results. The alternative approach to normalization is synthesized; it enables to complete a full structural analysis. Thus, the reliability indices of the entire system or parts, whose operational safety determines the machine reliability, can be assessed. Parts and other components, whose failures are not sudden, are considered without using the exponential law. This preserves the inherent simplicity of mathematical operations.
Discussion and Conclusions. The numerical value of the reliability probability (RP) of the machine as a whole, taken at the stage of the task order, is insufficient for the reliability target design. The specified RP and running time of the system elements, which are sources of failures developing according to different laws, are required. The results obtained can be used both in designing new mechanical systems with the reliability target, and in the modernization of machines.

Ключевые слова: надежность, вероятность, безотказность, наработка, машина, техническая система, элемент.

Keywords: reliability, probability, failure-free performance, running time, machine, technical system, element.

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E-mail: manshin@mail.ru, elemans@mail.ru
***The research is done within the frame of the independent R&D.

Образец для цитирования: Маньшин, Ю. П. Надежность деталей и неремонтируемых узлов при проектировании машин / Ю. П. Маньшин, Е. Ю. Маньшина // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2018. — Т. 18, № 4. — С.392-400. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2018-18-4-392-400

For citation: Yu.P. Manshin, E.Yu. Manshina. Reliability of parts and unrestorable components in the machine design. Vestnik of DSTU, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 392-400. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2018-18-4-392-400

Введение. Условия постановки на производство продукции машиностроения и единая система конструкторской документации (ЕСКД) [1–2] требуют, чтобы при разработке проекта машины учитывались следующие параметры надежности технических систем (ТС):
— долговечность — календарный срок службы T_k);
— безотказность — вероятность безотказной работы $P(t)$ ...);
— наработка $t = T$ часов (на этот период должна быть гарантирована ВБР).

Данные показатели согласуются на стадии технического задания (ТЗ) и характеризуют машину в целом. Разработчик должен повлиять на безотказность, которая является главным свойством надежности невосстанавливаемых ТС и в межремонтные периоды работы формирует долговечность восстанавливаемых ТС.

Наработка t является аргументом функции надежности $P(t)$. По любому закону надежности $P(t)$ монотонно убывает с наращиванием t. В силу этого для достижения требуемой ВБР наработка должна быть рационально минимизирована и выбрана в соответствии с логикой работы ТС [3].

Детали и невосстанавливаемые изделия, вырабатывая свой ресурс, определяют наработку системы на отказ. В идеале наработки элементов на отказ должны совпадать или хотя бы быть кратными выбранной наработке ТС. При этом календарный срок службы T_k и требуемая наработка T связываются соотношением:

$$T = T_k \cdot 365 \cdot K_{год} \cdot 24 \cdot K_{сут} \cdot ПВ\ ,\ ч, \tag{1}$$

где T_k — календарный срок службы в годах; $K_{год}$ — коэффициент возможного использования ТС в год; $K_{сут}$ — коэффициент использования ТС в сутки; $ПВ$ — относительная продолжительность включения, которая представляет собой осредненное отношение времени включения (время разгона и время установившегося движения) ко времени рабочего цикла ТС.

Высокая вероятность безотказной работы (ВБР) возможна при снижении требуемой наработки. Если ее необходимо существенно увеличить, безотказность придется поддерживать следующим образом:
— чаще выполнять техническое обслуживание (ТО);
— при проектировании ключевых элементов закладывать более высокие затраты на обеспечение качества изделий [4, 5].

ВБР проекта может быть выбрана из существующих отраслевых нормативов, из конкурентных условий и по другим основаниям, в том числе из условных классов надежности, принятых для изделий машиностроения (табл. 1).

Таблица 1

Классы надежности изделий машиностроения

Класс надежности	0	1	2	3	4	5
Допустимое значение ВБР $P(t)$	≤ 0,9	≥ 0,9	≥ 0,99	≥ 0,999	≥ 0,9999	1

При рассмотрении классов надежности учитываются перечисленные ниже группы характеристик ТС [3, 6, 7].

1. По структурному типу изделий. Рассматриваются технологические комплексы, машины, агрегаты, механизмы и иерархия (уровни) их сборочных единиц и деталей. При последовательном взаимодействии элементов в большинстве машин ВБР растет с переходом к нижним уровням структурной схемы надежности. Тогда ВБР деталей при структурном анализе может приближаться к показателям 3–5 классов надежности.

2. По видам ТС. Планируемый уровень ВБР напрямую зависит от уровня ответственности производителя перед потребителем ТС. Безусловно, высочайший уровень ВБР планируется, например, для летательных аппаратов, машин химических производств, медоборудования, военной техники и т. п.

3. По видам последствий отказов. Планируемый уровень ВБР напрямую зависит от потенциального уровня ущерба при отказе машины (экономического, экологического, репутационного и пр.).

Общепринято [5, 6, 8–13] представление отказов ТС как внезапных. В этом случае ВБР описывается экспоненциальным законом

$$P(t) = e^{-\lambda t}\ . \tag{2}$$

Здесь интенсивность отказов λ в период нормального функционирования после приработки связывается со средней наработкой на отказ $\breve{T}$ системы

$$\lambda = 1/\breve{T} \tag{3}$$

с параметрами безотказности

$$\lambda = (-\ln P(T))/T\ . \tag{4}$$

Отсюда может быть рассчитана средняя наработка на отказ ТС

$$\breve{T} = -T\,/\,(\ln P(T))\ . \tag{5}$$

Этот алгоритм формирования параметров надежности ТС имеет как сторонников, так и критиков [7, 10, 14]. Все ли отказы происходят внезапно? Насколько верны параметры надежности ТС (3)–(5), вытекающие из экспоненциального закона? Эти вопросы возникают при определении интенсивности отказов (4) и соответствующей ВБР ТС (3) вне зависимости от методики оценки:

— по заданным наработке T и ВБР $P(T)$;
— по средней наработке на отказ $\breve{T}$;
— по результатам испытаний $\breve{T}$.

В литературе структурный анализ надежности ТС, преобразующих входное воздействие (ВВ) в выходные параметры (ВП) принято представлять как восходящий схемный анализ от ВБР элементов к ВБР систем. При этом рассматриваются структурные схемы: последовательные (рис. 1, *а*), параллельные (рис. 1, *б*) и комбинированные (рис. 1, *в*).

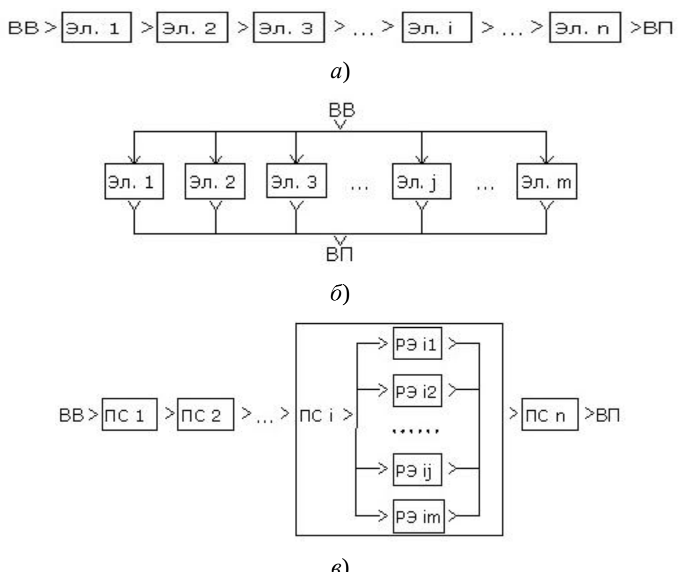


Рис. 1. Структурные схемы надежности технических систем при различных видах взаимодействия элементов

При последовательном взаимодействии элементов ТС (см. рис. 1, *а*), отказы которых независимы, экспоненциальный закон (2) представляет удобную математическую модель. Если ВБР системы $P(t)$ и элементов — подсистем $P_i(t)$ находятся в соотношении

$$P(t) = \prod_{i=1}^{n} P_i(t)\,, \tag{6}$$

то интенсивности отказов системы λ и подсистем λ_i находятся в соотношении

$$\lambda = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \tag{7}$$

и ранжируются в зависимости от принятого принципа распределения интенсивностей по элементам.

Иерархическая структурная схема, сформированная из вложенных уровней подсистем и элементов [3, 6, 8–12], позволяет выборочно или по всей структуре выполнять нисходящий анализ [3, 9] (от ВБР ТС к ВБР элементов). Требуемые значения ВБР элементов вместе с требуемой наработкой являются исходными данными для проектирования деталей с заданным уровнем надежности [15, 16].

Алгоритм нисходящего анализа на базе (2) позволяет одинаково успешно распределять интенсивности и ВБР элементов по всем вложенным уровням структурных схем. Это справедливо для радиоэлектронных систем [10, 11]. Но на уровне деталей механической системы [3] возникает противоречие: нельзя применять экспоненциальный закон, если развитие постепенного отказа протекает по другому закону. Отказ системы произойдет в результате последовательного

взаимодействия, не связанного с экспоненциальным законом. В то же время разработка структурной схемы надежности ТС имеет смысл, если она служит основанием для проектирования деталей и подбора стандартизованных элементов с требуемой ВБР на выбранную наработку.

При анализе ВБР ТС с параллельным взаимодействием элементов (см. рис. 1, *б*) учитываются следующие условия:
— элементы включены постоянно,
— их отказы независимы,
— каждый из m элементов имеет ВБР $P_j(t)$,
— каждый из m элементов способен принять входное воздействие и преобразовать его в выходной параметр ТС (см. рис. 1, *б*).

В этом случае отказ ТС произойдет после отказа последнего работоспособного элемента. Вероятность отказа системы через вероятности отказов элементов:

$$F(t) = \prod_{j=1}^{m} F_j(t). \tag{8}$$

Из свойства

$$P(t) + F(t) = 1 \tag{9}$$

вероятность безотказной работы системы через ВБР элементов:

$$P(t) = 1 - \prod_{j=1}^{m} [1 - P_j(t)]. \tag{10}$$

Для однородных элементов

$$P(t) = 1 - \left[1 - P_j(t)\right]^m. \tag{11}$$

Если цель — обеспечение заданной ВБР ТС и учитываются однородные резервированные элементы, то использование выражения экспоненциального закона (2) дает простой расчет интенсивности отказов элементов или числа элементов m только в соотношении (11). Для более сложных соотношений (10) и комбинированных структур (см. рис. 1, *в*) примеры использования экспоненциального закона не приводятся.

Простое разделение на элементы невозможно, если речь идет о сложных структурах с разнонаправленным взаимодействием элементов, имеющих зависимые отказы. Параметры функционирования и надежности должны определяться для системы в целом, а для этого, возможно, потребуется выполнить большой объем аналитических и экспериментальных работ. Графическое представление таких схем [7, 9] сопровождается упоминанием о сложности модели функционирования и громоздкости расчетов надежности (например, сложное замкнутое взаимозависимое функционирование блоков двигателя внутреннего сгорания или реактивного двигателя).

Основная часть. Для конструктивной реализации ТС с любым видом взаимодействия необходимо изготовить детали, из которых составляют сборочные единицы, а затем функциональные модули (механизмы, агрегаты, блоки питания, блоки управления и т. п.). Современный модульный принцип построения машин предусматривает модульные операции: разработку, сборку и отладку, модификацию и модернизацию, ремонт, замену и т. п. Детали и прочие элементы находятся на нижнем уровне иерархической конструктивной системы, состоящей из вложенных блоков. Используя ее в качестве структурной схемы надежности, необходимо найти критерий распределения ВБР по элементам. Следует рассмотреть не функцию $P(t)$, а ее численное значение $P(T)$. В этом случае можно подставить заданную наработку T и при распределении численных значений ВБР по элементам использовать в качестве критерия стоимости восстановления структурных единиц в случае их отказов. В стоимость восстановления могут быть включены:
— стоимости используемых для ремонта материалов, изделий, диагностики и ремонтных работ;
— оцененные в денежных единицах последствия отказа (восстановление других отказавших элементов при зависимых отказах, потери от простоя ТС, страховые выплаты на возмещение ущерба и др.).

Задачей настоящего исследования является разработка метода нисходящего анализа структурных схем надежности, устраняющего отмеченные выше противоречия. Структурная схема надежности ТС должна быть инструментом распределения ВБР элементов по заданной ВБР ТС на начальных стадиях проекта. Тогда выбранная наработка и сбалансированные ВБР элементов будут исходными данными для проектирования с заданным уровнем надежности. Для этого структурная схема должна удовлетворять ряду условий.

1. Структурная схема должна основываться на структуре конструкции. Это упростит сложные функциональные связи между элементами

2. Структурная схема должна содержать математическую модель надежности, доступную для расчетов на ранних стадиях проекта.

3. Модель надежности по структурной схеме должна опираться не на экспоненциальный закон, а только на фундаментальные свойства надежности технических объектов и систем (6), (8)–(11).

4. Критерием ранжирования ВБР элементов должна быть стоимость восстановления элемента в случае его отказа. Ее можно рассматривать как денежный эквивалент возмещения ущерба от отказа.

5. Нисходящий структурный анализ должен применяться одинаково эффективно как для последовательно взаимодействующих, так и для резервированных и комбинированных схем надежности.

Альтернативное представление численного значения ВБР объекта. Пока время t имеет значение аргумента функции безотказности $P(t)$, она представляет собой функцию, убывающую по любому из известных законов или полученную статистическим путем. После выбора требуемой наработки $t = T$ ВБР получает значение $P(t) = P(T)$ в границах $0 < P(T) < 1$. Такое число может быть представлено множеством способов, из которых выбирается показательное выражение

$$P(T) = B^X . \qquad (12)$$

X определяется из соотношения

$$X = lg\,(P(T))\,/\,lg\,B. \qquad (13)$$

Приняв значение основания степени $B = 10$, получим выражение численного значения ВБР:

$$P(T) = 10^X , \qquad (14)$$

откуда

$$X = lg\,P(T). \qquad (15)$$

Показатель степени X назовем параметром ранжирования (ПР) ВБР ТС. В приложении к элементам системы показатели степени X_i также именуются параметрами ранжирования ВБР элементов. Далее в этом представлении рассматривается «самый простой и самый важный случай» [13] надежности систем.

ВБР элементов ТС при их последовательном взаимодействии. Рассмотрим структурную схему надежности ТС с последовательным взаимодействием элементов (см. рис. 1, *а*), отказы которых независимы. В этом случае отказ системы при отказе любого из n элементов в момент времени $t = T$ выражается через ВБР элементов согласно (6):

$$P(T) = \prod_{i=1}^{n} P_i(T) .$$

В (6) произведение может быть получено множеством комбинаций $P_i(T)$ и видов их представления. Применив (14) для численных значений ВБР системы $P(T)$ и ее элементов, произведение $P(T) = P_1\ (T) \times P_2(T) \times ... \times P_n(T)$ можно представить:

$$10^X = 10^{X1} \times 10^{X2} \times ... \times 10^{Xn} ,$$

откуда связь ПР системы и элементов:

$$X = X_1 + X_2 + ... + X_n . \qquad (16)$$

Из множества возможных комбинаций X_i в (16) выбираются вытекающие из стоимостей восстановления отказавших элементов C_i. При этом элементы с большей стоимостью восстановления должны обладать большими ВБР $P_i(t)$. То есть при стоимостях восстановления элементов C_1, C_2, …, Cn набору ПР элементов X_1, X_2, ..., X_n должен быть сопоставлен набор обратных величин стоимостей $1/C_1$, $1/C_2$, ..., $1/C_n$. Указанное соотношение может быть записано суммами

$$1 = \frac{\frac{1}{C_1}}{\Sigma \frac{1}{C_i}} + \frac{\frac{1}{C_2}}{\Sigma \frac{1}{C_i}} + ... + \frac{\frac{1}{C_n}}{\Sigma \frac{1}{C_i}} ,$$

в которых принятые условия для ПР X_i получаются из почленного равенства слагаемых:

$$\frac{X_i}{X} = \frac{\frac{1}{C_i}}{\sum \frac{1}{C_i}} .$$

Правую часть этого равенства назовем «весовой коэффициент стоимости восстановления последовательно взаимодействующих элементов»:

$$a_i = \frac{\frac{1}{C_i}}{\sum \frac{1}{C_i}} . \qquad (17)$$

Значения ПР X_i, отвечающие условию ранжирования:

$$X_i = Xa_i . \quad (18)$$

Единица измерения стоимости восстановления не имеет значения, так как в (17) используются отношения стоимостей. Нисходящий анализ ВБР элементов ТС с последовательным взаимодействием рассмотрен в примере 1. Представленная ниже система содержит для простоты три элемента. Однако для действия алгоритма, основанного на (14–18), возможно любое число элементов.

Пример 1. Расчет вероятностей безотказной работы элементов ТС с последовательным взаимодействием (см. рис. 1, *а*). Исходные данные:

— ВБР системы $P(T)$ = 0,9;
— число элементов n = 3;
— стоимости восстановления элементов (в у. е.): C_1 = 5000, C_2 = 3000, C_3 = 2000.

ПР для ВБР ТС (15): $X = lg\,P(T) = lg\,0{,}9 = -0{,}04576$.

Результаты пооперационного расчета ВБР элементов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Расчет ВБР элементов ТС с последовательным взаимодействием

Объект	C_i, у. е.	$1/C_i$	a_i (17)	X_i (18)	$P_i(T)$ (14)
ТС				–0,04576	0,9
Элемент 1	5000	0,0002	0,193548	–0,00886	0,979814
Элемент 2	3000	0,000333	0,322581	–0,01476	0,966584
Элемент 3	2000	0,0005	0,483871	–0,02214	0,950297
Контрольные суммы и произведения		$\sum(1/C_i)$	$\sum a_i$	$\sum X_i$	$P(T)=\prod P_i(T)$
		0,001033	1	–0,04576	0,9

ВБР элементов ТС при их параллельном взаимодействии. Рассмотрим следующую ситуацию: отказ системы при отказе всех элементов с вероятностью $F(T)$ в момент времени $t = T$, соответствующий выбранной наработке. В этом случае основное свойство параллельно взаимодействующих элементов (см. рис. 1, *б*) согласно (8) выражается через вероятность отказов элементов $F_j(T)$:

$$F(T) = \prod_{j=1}^{m} F_j(T) .$$

Принимая по аналогии с (14)

$$F(T) = 10^Y , \quad (19)$$

где Y определяется из логарифмического уравнения $lg\,(F(T)) = Y\,lg10$:

$$Y = lg\,F(T). \quad (20)$$

Показатель степени Y назовем параметром ранжирования вероятности отказа ТС. Если речь идет об элементах системы, показатели степени Y_j называются параметрами ранжирования вероятности отказа элементов. Условия (8, 19) могут быть представлены произведением $10^X = 10^{Y1} \times 10^{Y2} \times ... \times 10^{Yn}$, откуда

$$Y = Y_1 + Y_2 + ... + Y_n . \quad (21)$$

Из множества возможных комбинаций Y_j в (21) выбираются вытекающие из стоимостей восстановления отказавших элементов C_j. При этом элементы с большей стоимостью восстановления должны обладать меньшими вероятностями отказа (что также означает большие ВБР). То есть при стоимостях восстановления элементов C_1, C_2, ..., C_m ряду показателей степени $Y_1, Y_2, ..., Y_m$ должен быть сопоставлен ряд стоимостей $C_1, C_2, ..., C_m$. Указанное соотношение может быть записано суммами

$$1 = \frac{Y_1}{Y} + \frac{Y_2}{Y} + ... + \frac{Y_m}{Y} \text{ и } 1 = \frac{C_1}{\sum C_j} + \frac{C_2}{\sum C_j} + ... + \frac{C_m}{\sum C_j} .$$

Здесь выбранные условия для показателей степени при Y_j получаются из почленного равенства слагаемых: $\frac{Y_j}{Y} = \frac{C_j}{\sum C_j}$. Правую часть равенства назовем «весовой коэффициент стоимости восстановления при параллельном взаимодействии элементов»:

Вестник Донского государственного технического университета. 2018. Т. 18, № 4. С. 392–400. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006
Vestnik of Don State Technical University. 2018. Vol. 18, no. 4, pp. 392–400. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006

$$b_j = \frac{C_j}{\sum C_j}. \quad (22)$$

Значения ПР Y_j, отвечающие сформулированному выше соотношению:

$$Y_j = Y b_j. \quad (23)$$

Нисходящий анализ вероятностей отказов и ВБР элементов ТС с параллельным взаимодействием рассмотрены в примере 2. Система состоит из трех элементов.

Пример 2. Расчет вероятностей отказа и ВБР элементов технической системы с параллельным взаимодействием (см. рис. 1, *б*). Исходные данные:

— ВБР системы $P(T) = 0{,}9$;
— число элементов $m = 3$;
— стоимости восстановления элементов (в у. е.): $C_1 = 5000$, $C_2 = 3000$ и $C_3 = 2000$.

Рассчитаем показатели надежности системы. Вероятность отказа системы из (9):

$$F(T) = 1 - P(T) = 1 - 0{,}9 = 0{,}1.$$

Значения ПР для вероятности отказа системы из (20):

$$Y = lg\, F(T) = lg\, 0{,}1 = -1.$$

Результаты пооперационного расчета приводятся в табл. 3.

Таблица 3

Расчет ВБР элементов ТС с параллельным взаимодействием

Объект	C_j, у. е.	b_j (22)	Y_j (23)	$F_j = 10^{Y_j}$	$P_j(T) = 1 - F_j(T)$
ТС			–1	0,1	0,9
Элемент 1	5000	0,5	–0,5	0,316228	0,683772
Элемент 2	3000	0,3	–0,3	0,501187	0,498813
Элемент 3	2000	0,2	–0,2	0,630957	0,369043
Контрольные суммы и произведения	$\sum C_j$	$\sum b_j$	$\sum Y_j$	$F(T) = \prod F_j(T)$	$P(T) = 1 - \prod (1 - P_j(T))$
	10000	1	–1	0,1	0,9

Пример 3. Расчет вероятностей безотказной работы элементов комбинированной ТС (см. рис. 1, *в*). Исходные данные:

— число последовательно взаимодействующих подсистем $n = 3$;
— число параллельно взаимодействующих элементов подсистемы ПС3 $m = 4$;
— ВБР системы $P(T) = 0{,}95$;
— стоимости восстановления подсистем (в у. е.): $C_1 = 5000$, $C_2 = 8000$, $C_3 = 12000$;
— стоимости восстановления параллельно взаимодействующих элементов (в у. е.): $C_{3,1} = 3000$, $C_{3,2} = 4000$, $C_{3,3} = 5000$, $C_{3,4} = 6000$.

Рассчитаем параметры надежности системы. ПР для ВБР ТС из (15):

$$X = lg\, P(T) = lg\, 0{,}95 = -0{,}022276.$$

Результаты пооперационного расчета приводятся в табл. 4 и 5.

Таблица 4

Расчет ВБР подсистем ТС с последовательным взаимодействием

Объект	C_i, у. е.	$1/C_i$	a_i (17)	X_i (18)	$P_i(T)$ (14)	
ТС				–0,022276	0,95	
ПС 1	5000	0,000200	0,489796	–0,010911	0,975190	
ПС 2	8000	0,000125	0,306122	–0,006819	0,984421	
ПС 3	12000	0,000083	0,204082	–0,004546	0,989587	◄*
Контрольные суммы и произведения		$\sum (1/C_i)$	$\sum a_i$	$\sum X_i$	$P(T) = \prod P_i(T)$	
		0,000408	1	–0,022276	0,95	
* ◄ — знак выбора подсистемы для дальнейшего нисходящего анализа.						

Из табл. 4 ВБР подсистемы ПС3 $P_3(T)$ = 0,989587. Вероятность отказа ПС3 (8) $F_3(T) = 1 - P_3(T) = 1 - 0,989587 = 0,010413$. ПР для вероятности отказа ПС3 (22):
$Y = \lg F_3(T) = lg 0,010413 = -1,982407$.
Результаты пооперационного расчета приводятся в табл. 5.

Таблица 5

Расчет ВБР элементов ТС3 с параллельным взаимодействием

Объект	C_j , у. е.	b_j (22)	Y_j (23)	$F_j = 10^{Y_j}$	$P_j(T) = 1 - F_j(T)$
ПС3			–1,982407	0,010413	0,989587
Элемент 3,1	3000	0,166667	–0,330401	0,467303	0,532697
Элемент 3,2	4000	0,222222	–0,440535	0,362631	0,637369
Элемент 3,3	5000	0,277778	–0,550669	0,281405	0,718595
Элемент 3,4	6000	0,333333	–0,660802	0,218372	0,781628
Контрольные суммы и произведения	$\sum C_j$	$\sum b_j$	$\sum Y_j$	$F(T) = \prod F_j(T)$	$P(T) = 1 - \prod (1 - P_j(T))$
	18000	1	–1,982407	0,010413	0,989587

Следует принять требуемую наработку ТС и всех ее элементов (1), чтобы ВБР элементов, рассчитанных в табл. 2–5, были исходными данными для расчета и подбора элементов с заданным уровнем надежности.

Необходимо определить полученные ресурсы по соответствующим моделям надежности с расчетными ВБР (табл. 2, 3, 5). Для этого учитываются размеры и конструктивные параметры элементов (деталей, стандартных и других невосстанавливаемых изделий), полученные на стадии эскизного проекта. Затем могут быть приняты меры для сближения полученных и заданных ресурсов [15, 16].

Заключение. Разработан и проверен на численных примерах метод нисходящего анализа структурных схем надежности машин. Его алгоритм совпадает с последовательностью стадий проектирования: от ВБР машины — к ВБР ее деталей. Выбор требуемой наработки и распределение ВБР по деталям на начальных стадиях проекта обеспечивают возможность проектирования с заданным уровнем безотказности. Структурная схема может базироваться на структуре конструкции. Таким образом, обеспечивается универсализация подхода к формированию структурных схем надежности при различных видах взаимодействия элементов. Критерий ранжирования ВБР элементов — стоимость восстановления элемента в случае его отказа. В нее на любом уровне структурной схемы включается денежный эквивалент стоимостей материалов, изделий, ремонтных работ, ущерба от отказа. Они с достаточной точностью известны на начальной стадии разработки машин.

Устранена необходимость использования экспоненциального закона при нормировании надежности и разработке ее структурных схем. Анализ ВБР опирается только на фундаментальные свойства надежности, общие для всех технических объектов и систем. Алгоритм анализа сохраняется на всех уровнях структурных схем, включая уровни деталей.

Математические модели структурных схем просты, доступны для расчетов на ранних стадиях проекта, одинаково эффективны для последовательно взаимодействующих, резервированных и комбинированных схем надежности. Они дают удобные возможности алгоритмизации, программирования и коррекции данных.

Библиографический список

1. ГОСТ 15.001-88. Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения / Государственный комитет СССР по стандартам. — Москва : Изд-во стандартов, 1988. — 7 с.

2. ГОСТ 2.103-2013. Единая система конструкторской документации. Стадии разработки / Всероссийский научно-исследовательский институт стандартизации и сертификации в машиностроении ; Научно-исследовательский центр CALS-технологий «Прикладная логистика» ; Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии ; Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. — Москва : Изд-во стандартов, 2015. — 6 с

3. Маньшин, Ю. П. Планирование и оценка надежности технической системы на ранних стадиях проекта / Ю. П. Маньшин, Е. Ю. Маньшина // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : мат-лы 7-й междунар. науч.-практ. конф. в рамках 17-й междунар. агропром. выставки «Интерагромаш-2014». — Ростов-на-Дону : Изд-во ДГТУ, 2014. — С. 169–171.

4. Ковалев, А. Н. Экономическое обеспечение надежности машин / А. Н. Ковалев, Б. И. Кантор, А. Б. Можаев. — Москва : Машиностроение, 1991. — 238 с.
5. Дальский, А. М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин / А. М. Дальский. — Москва : Машиностроение, 1975. — 225 с.
6. Волков, Д. П. Надежность строительных машин и оборудования / Д. П. Волков, С. Н. Николаев. — Москва : Высшая школа, 1979. — 400 с.
7. Пронников, А. С. Параметрическая надежность машин / А. С. Пронников. — Москва : Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. — 560 с.
8. Шубин, В. С. Надежность оборудования химических и нефтеперерабатывающих производств / В. С. Шубин, Ю. А. Рюмин. — Москва : Химия ; КолосС, 2006. — 359 с.
9. Андросов, А. А. Курсовое проектирование технических систем с заданным уровнем надежности / А. А. Андросов, Ю. П. Маньшин, Е. Ю. Маньшина. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2013. — 93 с.
10. Половко, А. М. Основы теории надежности / А. М. Половко, С. В. Гуров. — Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2006. — 704 с.
11. Дружинин, Г. В. Надежность автоматизированных систем / Г. В. Дружинин. — 3-е изд., перераб. и доп. — Москва : Энергия, 1977. — 536 с.
12. Маньшин, Ю. П. Расчеты параметров надежности элементов при проектировании машин / Ю. П. Маньшин, Е. Ю. Маньшина // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : мат-лы 10-й междунар. науч.-практ. конф. в рамках 20-й междунар. агропром. выставки «Интерагромаш-2017». — Ростов-на-Дону : Изд-во ДГТУ, 2017. — С. 261–263.
13. Гнеденко, Б. В. Математические методы в теории надежности / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. — Москва : Наука, 1965. — 573 с.
14. Хозяев, И. А. Надежность биотехнических систем / И. А. Хозяев. — Ростов-на-Дону : Изд-во ДГТУ, 2014. — 235 с.
15. Маньшин, Ю. П. Приближенная оценка ресурса детали, обеспечивающая ее требуемый ресурс с заданной вероятностью безотказной работы / Ю. П. Маньшин, Е. Ю. Маньшина // Вестник машиностроения. — 2017. — № 12. — С. 20–24.
16. Man'shin, Yu. P. Estimating the Life of a Machine Part / Yu. P. Man'shin, E. Yu. Man'shina // Russian Engineering Research. — 2018. — Vol. 38, № 3. — P. 157–162. DOI : https://doi.org/10.3103 / S1068798X18030103

Поступила в редакцию 21.08.2018
Сдана в редакцию 21.08.2018
Запланирована в номер 19.10.2018

Received 21.08.2018
Submitted 21.08.2018
Scheduled in the issue 19.10.2018

Об авторах

Маньшин Юрий Павлович,
доцент кафедры «Основы конструирования машин» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2246-2965
manshin@mail.ru

Маньшина Елена Юрьевна,
старший преподаватель кафедры «Основы конструирования машин» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID:http://orcid.org/0000-0002-3027-1309
elemans@mail.ru

Authors:

Manshin, Yury P.,
associate professor of the Machine Design Principles Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF), Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2246-2965
manshin@mail.ru

Manshina, Elena Yu.,
senior lecturer of the Machine Design Principles Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF),
ORCID:http://orcid.org/0000-0002-3027-1309
elemans@mail.ru